

三型螺旋桨振动特性试验研究



项松^{1,2},王颐²,张业伟²,王志²,刘远强²

1. 辽宁通用航空研究院, 辽宁 沈阳 110136

2. 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110136

摘要:本文基于高频电动振动试验系统,采用谐振搜索与驻留方法,测量出三型螺旋桨的固有频率。结果表明,X1930型螺旋桨的第一阶固有频率为51.81Hz,W80CM8型螺旋桨的第一阶固有频率为51.65Hz,76EM8型螺旋桨的第一阶固有频率为48Hz。某型电动四座飞机螺旋桨的最大工作转速为40Hz,这三型螺旋桨的第一阶固有频率均超过工作转速,可保证螺旋桨在爬升和巡航状态下平稳运行,在工作转速范围内不会发生共振。将试验结果数据与有限元模态分析数据进行对比,表明试验方法合理可靠,获得的三型螺旋桨的固有频率为某型电动四座飞机螺旋桨选型提供了参考。

关键词: 电动飞机; 螺旋桨; 振动; 固有频率; 共振

中图分类号: V211.44

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.01.006

航空科技发展水平是体现一个国家综合国力的重要标志之一^[1]。电动飞机是未来航空发展热点方向,是一种新型清洁能源的飞行器,可降低飞行器的运行成本、飞行噪声和污染排放,是实现航空工业高效、安静和无污染排放的绿色航空目标的优选^[2]。电动通用飞机以锂电池为能源,采用电动机驱动螺旋桨产生拉力或推力,螺旋桨共振将导致电动飞机整机振动过大,影响飞行员及乘客的舒适性,并对飞机的结构造成严重损伤。因此,在电动通用飞机初步设计阶段,需要开展螺旋桨扫频振动试验,获得螺旋桨的各阶固有频率,防止螺旋桨固有频率与工作转速重合。

针对螺旋桨振动特性测试与计算,国内外学者开展了大量的研究,魏武国^[3]基于循环对称结构模态分析理论,建立了螺旋桨整体结构振动特性仿真分析方法,大大降低了求解规模。牛宏伟等^[4]通过飞行试验方法研究了某型飞机单发推进式螺旋桨的振动应力特性,获得了螺旋桨在典型工作状态下的静应力和动应力。项松等^[5]利用ES-2-150振动试验系统进行了两叶木质螺旋桨和碳纤维螺旋桨的振动特性试验,采用谐振搜索与驻留方法测量出两种螺旋桨的第一阶固有频率,最终确定了某型电动飞机振动故障的原因,保证了该型电动飞机适航取证工作的顺利进行。孔瑞莲等^[6]采用有限元法对某型螺旋桨及其改型桨桨叶的

振动特性进行了计算和分析,结果表明,对于长梁结构的螺旋桨桨叶,用动频系数计算各转速下的动频是可行的。顾仲权等^[7]研究考虑了桨叶挥舞和摆振弯曲、桨角变化以及扭转与纵向振动耦合的螺旋桨-减速器-发动机系统固有特性计算问题,提出了一种合理的算法。尚玲玲等^[8]发展了一种桨叶对称削层结构的分区优化方法,有效避开桨叶共振区间,实现了螺旋桨轻质量和高固有频率之间的权衡设计。牛宏伟等^[9]通过振动应力实测和仿真分析相结合,研究螺旋桨的共振转速特性,为螺旋桨结构动力学设计提供了依据。程俊杰等^[10]提出了一种以最小化质量和最大化一阶固有频率作为两个优化目标的螺旋桨结构优化方法,有效避免了桨叶共振。J. Joshi等^[11]测定了三种不同材料螺旋桨振动的固有频率并对结果进行了分析,确定了适合螺旋桨制造的材料。王正峰等^[12]针对传统激励器激励方法不能识别高于50Hz尾桨频率问题,发展了基于升降转速自然激励的尾桨固有频率识别方法。陈兆林等^[13]对不同结构参数的吊舱-螺旋桨系统和机翼-吊舱-螺旋桨系统进行了旋转颤振分析,总结出机翼对发动机旋转颤振的影响规律,揭示了其影响机理。丛家勇^[14]应用机械振动理论建立整体的振动微分方程,对直升机尾传动系统进行动力学分析,获得了该系统的固有频率和振型。李其汉等^[15]用试验模态分析

收稿日期: 2022-05-18; 退修日期: 2022-11-03; 录用日期: 2022-12-05

基金项目: 辽宁省教育厅项目(JYT19004)

引用格式: Xiang Song, Wang Yi, Zhang Yewei, et al. Experimental study on the vibration characteristics of three propellers[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(01): 45-50. 项松, 王颐, 张业伟, 等. 三型螺旋桨振动特性试验研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(01): 45-50.

技术分析了螺旋桨桨叶振动特性,分析了桨叶根部连接状态和安装方式对固有频率和模态的影响。Xing Xueyan等^[16]设计了一种基于反步技术的控制方法,使螺旋桨系统振动控制在一个很小的区域。高宇^[17]对某型复合材料螺旋桨桨叶的振动特性进行分析计算,得到了螺旋桨桨叶的静频和动频。

谐振搜索和驻留方法通过正弦信号发生器改变振动的频率和幅值,控制试件在一定频率范围内按要求振动,试件振幅峰值对应的频率即为固有频率。本文基于高频电动振动试验系统,采用谐振搜索与驻留方法,测量出三型螺旋桨的固有频率,并对试验结果进行分析,三型螺旋桨分别为X1930型、W80CM8型和76EM8型。这三型螺旋桨的第一阶固有频率均超过工作转速,在工作转速范围内不会发生共振。

1 试验设备

螺旋桨振动特性试验采用高频电动振动试验系统(见图1)进行,该试验系统可进行正弦、随机、冲击、正弦叠加随机等振动激振,同时具有冲击响应谱控制、疲劳等效谱计算、谐振搜索与驻留等高级功能。该试验系统主要由振动台体、功率放大器、风机、垂直扩展台面、水平扩展台面、振动控制仪等部分组成。功率放大器的型号为MPA407;振动发生机的型号为G334A;风机型号为HP-3;水平滑台型号为GT600M;垂直扩展台面型号为HE600SQ/A;软件为Vibration VIEW(VR9500)。



图1 高频电动振动试验系统

Fig.1 High-frequency electrodynamic vibration experimental system

2 扫频振动试验

2.1 试验件

试验件为三型螺旋桨,分别是X1930型、W80CM8型和76EM8型。

2.1.1 X1930型螺旋桨

X1930型螺旋桨为两叶固定桨距木质螺旋桨,直径1.93m,自主设计的气动外形,在丹东飓风螺旋桨公司加工,螺旋桨采用法兰盘及螺栓固定在振动台上,如图2所示。



图2 X1930型螺旋桨

Fig.2 X1930 propeller

2.1.2 W80CM8型螺旋桨

W80CM8型螺旋桨为两叶固定桨距木质螺旋桨,直径1.93m,由美国Sensenich螺旋桨公司生产,螺旋桨采用法兰盘及螺栓固定在振动台上,如图3所示。



图3 W80CM8型螺旋桨

Fig.3 W80CM8 propeller

2.1.3 76EM8型螺旋桨

76EM8型螺旋桨为两叶固定桨距金属螺旋桨,直径1.93m,由美国Sensenich螺旋桨公司生产,螺旋桨采用法兰盘及螺栓固定在振动台上,如图4所示。

2.2 试验方法

高频电动振动试验系统具有谐振搜索与驻留功能,因此,采用谐振搜索与驻留方法测量螺旋桨的固有频率。谐振搜索与驻留方法通过正弦扫频试验,搜索出螺旋桨的固有频率。并且可以在固有频率上进行跟踪驻留试验。



图4 76EM8型螺旋桨
Fig.4 76EM8 propeller

振动台振幅为 0.5g, 起始频率为 10Hz, 终止频率为 160Hz。振动台加速度曲线如图 5 所示, 图中红线为警戒线。

3 试验结果

3.1 X1930 型螺旋桨

螺旋桨振动加速度曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出, X1930 型螺旋桨第一阶固有频率为 51.81Hz, 第二阶固有频率为 101.8Hz。某型电动四座飞机最大转速为 2400r/min

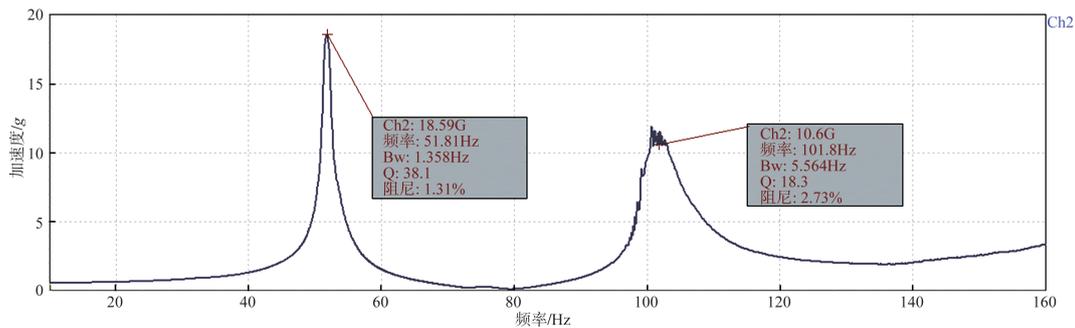


图6 X1930型螺旋桨加速度曲线
Fig.6 Acceleration curve of X1930 propeller

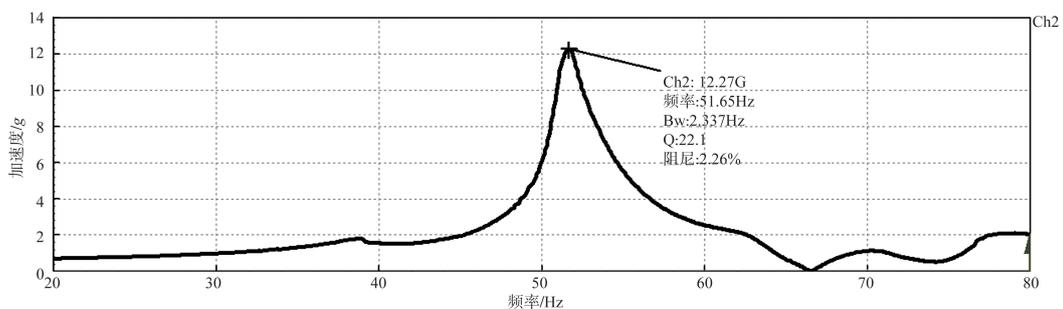


图7 W80CM8型螺旋桨加速度曲线
Fig.7 Acceleration curve of W80CM8 propeller

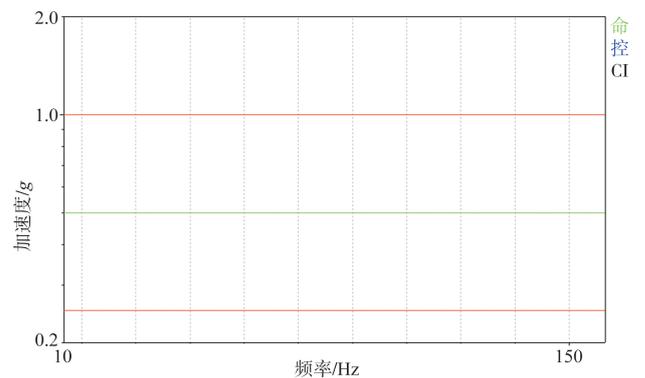


图5 振动台加速度曲线
Fig.5 Vibration table acceleration curve

(40Hz), 转频远离螺旋桨第一阶固有频率, 可保证螺旋桨平稳运行。

3.2 W80CM8 型螺旋桨

螺旋桨振动加速度曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出, W80CM8 型螺旋桨第一阶固有频率为 51.65Hz。某型电动四座飞机最大转速为 2400r/min(40Hz), 转频远离螺旋桨第一阶固有频率, 可保证螺旋桨平稳运行。

3.3 76EM8 型螺旋桨

螺旋桨振动加速度曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出,

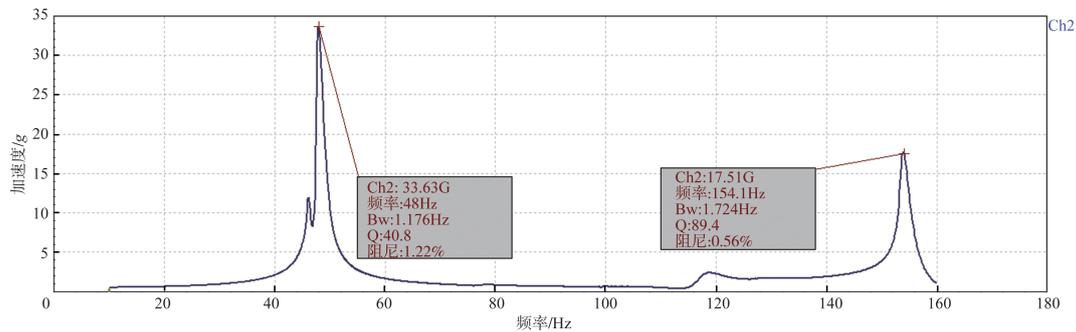


图8 76EM8型螺旋桨加速度曲线

Fig.8 Acceleration curve of 76EM8 propeller

76EM8型螺旋桨第一阶固有频率为48Hz,第二阶固有频率为154.1Hz。某型电动四座飞机最大转速为2400r/min(40Hz),转频远离螺旋桨第一阶固有频率,可保证螺旋桨平稳运行。

4 模态分析

对X1930型、W80CM8型与76EM8型螺旋桨进行模态分析。通过对螺旋桨的模态分析可以很直观地看到螺旋桨的整体和部分结构是否合理,在本文中,对螺旋桨的模态分析是对螺旋桨施加一个轴约束来进行的。在有限元软件中,通过对螺旋桨划分网格,设置分析求解步骤,得到了螺旋桨的固有频率和振型图。

4.1 X1930型螺旋桨

从图9可以看出,振动的最大变形为83.93mm,发生在螺旋桨桨尖部位。通过有限元软件得到X1930型螺旋桨的第一阶固有频率为51.87Hz,试验结果为51.81Hz,计算结果与试验结果具有较好的一致性。

4.2 W80CM8型螺旋桨

从图10可以看出,振动的最大变形为57.18mm,发生



图9 X1930型螺旋桨一阶模态

Fig.9 First-order modal of X1930 propeller



图10 W80CM8型螺旋桨一阶模态

Fig.10 First-order modal of W80CM8 propeller

在螺旋桨桨尖部位。通过有限元软件得到W80CM8型螺旋桨的第一阶固有频率为54.78Hz,试验结果为51.65Hz,计算结果与试验结果具有较好的一致性。

4.3 76EM8型螺旋桨

从图11、图12可以看出,76EM8型螺旋桨在第一阶模态的最大变形量为26.77mm,在第二阶模态的最大变形量为32.52mm,均发生在桨尖位置处。计算得到76EM8型螺旋桨的第一阶固有频率为49.75Hz,第二阶固有频率为148.19Hz,试验得到第一阶固有频率为48Hz,第二阶为154.1Hz,计算结果与试验结果具有较好的一致性。

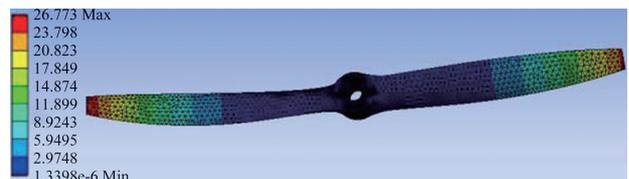


图11 76EM8型螺旋桨一阶模态

Fig.11 First-order modal of 76EM8 propeller

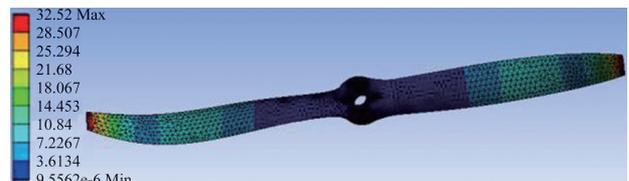


图12 76EM8型螺旋桨二阶模态

Fig.12 Second-order modal of 76EM8 propeller

对比仿真数据与试验数据,两者一致性较好。表明试验方法可靠,获得的数据可以为螺旋桨选型提供参考。

5 结论

本文基于高频电动振动试验系统,采用谐振搜索与驻留方法,测量出三型螺旋桨的固有频率。通过研究,可以得

出以下结论:

(1) X1930 型、W80CM8 型和 76EM8 型螺旋桨的第一阶固有频率均远离某型电动四座飞机螺旋桨的最大工作转速, 可保证正常工作, 正常工作时不会发生共振。

(2) 通过有限元软件进行了螺旋桨模态分析, 固有频率计算结果与试验结果一致性较好, 表明试验数据合理可靠, 为后续电动四座飞机螺旋桨选型提供了参考。

AST

参考文献

- [1] 宋庆国. 百年未有之大变局下的航空科技发展[J]. 航空科学技术, 2021, 32(3):1-5.
Song Qingguo. The development of aviation science and technology under changes unseen in a century[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(3):1-5. (in Chinese)
- [2] 梁向东. 电动飞行器及其关键技术的研究探析[J]. 航空科学技术, 2020, 31(6):1-6.
Liang Xiangdong. Research on electric vehicle and its key technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(6):1-6. (in Chinese)
- [3] 魏武国. 航空螺旋桨振动特性的影响因素[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13):5396-5402.
Wei Wuguo. Study on vibration characteristics simulation analysis method of aircraft propeller[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(13):5396-5402. (in Chinese)
- [4] 牛宏伟, 郭海东, 张永峰. 推进式螺旋桨振动应力特性飞行试验与分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18):7507-7515.
Niu Hongwei, Guo Haidong, Zhang Yongfeng. Flight test and analysis on the vibratory stress characteristics of a pusher propeller[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(18):7507-7515. (in Chinese)
- [5] 项松, 杨凤田, 王志, 等. 某型电动飞机螺旋桨振动特性实验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(2):338-342.
Xiang Song, Yang Fengtian, Wang Zhi, et al. Experimental study of vibration characteristics for an electric aircraft propeller[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(2):338-342. (in Chinese)
- [6] 孔瑞莲, 王延荣. 某型螺旋桨桨叶振动特性计算分析[J]. 航空动力学报, 1991, 6(4):342-344.
Kong Ruilian, Wang Yanrong. Vibration characteristic analysis of a propeller blade[J]. Journal of Aerospace Power, 1991, 6(4):342-344. (in Chinese)
- [7] 顾仲权, 王远达. 螺旋桨—减速器—发动机耦合系统振动固有特性的计算[J]. 航空动力学报, 1991(3):244-248.
Gu Zhongquan, Wang Yuanda. Calculation of modal characteristics for a propeller-gear box-engine couple system [J]. Journal of Aerospace Power, 1991(3):244-248. (in Chinese)
- [8] 尚玲玲, 王海峰, 口启慧, 等. 平流层飞艇三叶螺旋桨结构优化方法[J]. 航空动力学报, 2022(5):1-10.
Shang Lingling, Wang Haifeng, Kou Qihui, et al. Structure optimization method of three-blade propeller for stratospheric airship[J]. Journal of Aerospace Power, 2022(5): 1-10. (in Chinese)
- [9] 牛宏伟, 郭海东, 张永峰. 基于振动应力飞行实测的螺旋桨旋转共振特性研究[J]. 现代机械, 2017(3):77-80.
Niu Hongwei, Guo Haidong, Zhang Yongfeng. Research on the rotation resonance characteristics of propeller based on in-flight vibration stress test[J]. Modern Machinery, 2017(3): 77-80. (in Chinese)
- [10] 程俊杰, 王海峰, 尚玲玲, 等. 一种高空飞艇螺旋桨结构多目标优化设计方法[J]. 航空动力学报, 2021, 36(3):584-591.
Cheng Junjie, Wang Haifeng, Shang Lingling, et al. Multi-objective optimization design method for propeller structure of a high-altitude airship[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(3):584-591. (in Chinese)
- [11] Joshi J, Manral A R, Arya N M, et al. Robust material of propeller blade for its Eigen frequency[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44: 1.
- [12] 王正峰, 赵文梅, 李燕秀. 尾桨升降转速自然激励固有频率识别方法研究[J]. 直升机技术, 2019(2):18-21.
Wang Zhengfeng, Zhao Wenmei, Li Yanxiu. Tail rotor up and down rotate speed nature excitation modal frequency distinguishing method[J]. Helicopter Technique, 2019(2): 18-21. (in Chinese)
- [13] 陈兆林, 杨智春, 谷迎松. 机翼对螺旋桨发动机旋转颤振的影响研究[J]. 航空学报, 2016, 37(11):3351-3360.
Chen Zhaolin, Yang Zhichun, Gu Yingsong. Effect of wing on whirl flutter of propeller engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11):3351-3360. (in Chinese)
- [14] 丛家勇. 直升机尾传动系统的动力学分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

- Cong Jiayong. Dynamic analysis for helicopter tail rotor transmission system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008.(in Chinese)
- [15] 李其汉,陈志英,张大林. 螺旋桨桨叶试验模态分析[J]. 航空动力学报, 1991, 6(4):337-341.
- Li Qihan, Chen Zhiying, Zhang Dalin. Experimental modal analysis of propeller blades[J]. Journal of Aerospace Power, 1991, 6(4):337-341.(in Chinese)
- [16] Xing Xueyan, Liu Jinkun. Vibration control of aero two-blade propeller with input and output constraints based on PDE model[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 93(C): 105291.(in Chinese)
- [17] 高宇. 复合材料螺旋桨桨叶强度与振动分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- Gao Yu. Research on strength and vibration of composite propellers[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2005.(in Chinese)

Experimental Study on the Vibration Characteristics of Three Propellers

Xiang Song^{1,2}, Wang Yi², Zhang Yewei², Wang Zhi², Liu Yuanqiang²

1. Liaoning General Aviation Academy, Shenyang 110136, China

2. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

Abstract: Based on the high-frequency electrodynamic vibration experimental system, the natural frequency of the three types of propellers is measured by resonance search and residence method. The results show that the first-order natural frequency of the X1930 propeller is 51.81Hz, the W80CM8 propeller is 51.65Hz, and the 76EM8 propeller is 48Hz. The maximum operating frequency of the propeller of an electric four-seat aircraft is 40Hz, and the first natural frequency of these three propellers exceeds the working frequency. The propeller operates smoothly in cruise and climb condition and does not resonate in the working speed range. By comparing the test results with the finite element modal simulation results, it shows that the test method is reasonable and reliable. The natural frequency of the three types of propellers provides a reference for the propeller selection of an electric four-seat aircraft.

Key Words: electric aircraft; propeller; vibration; natural frequency; resonance

Received: 2022-05-18; **Revised:** 2022-11-03; **Accepted:** 2022-12-05

Foundation item: Research Foundation of Education Bureau of Liaoning Province(JYT19004)